

PRISE EN COMPTE DES EFFETS DIFFERES DES ROCHES ARGILEUSES SUR LA CONCEPTION DE TUNNELS PROFONDS

ACCOUNTING FOR LONG TERM EFFECTS OF CLAYSTONES FOR THE DESIGN OF DEEP TUNNELS

Victor Augusto RIBEIRO LIMA¹, Jean-François BRUCHON¹, Sébastien BURLON¹

¹ Setec Terrasol, Paris, France

RÉSUMÉ – Cette étude s'intéresse à la modélisation du comportement différé des galeries profondes excavées dans des roches argileuses présentant un comportement différé telles que l'argilite du Callovo-Oxfordien (COX). Un enjeu de cette modélisation est la prédiction fiable de l'évolution des efforts qui sollicitent le soutènement des galeries. Parmi les différents modèles de fluage identifiés dans la littérature, les modèles visco-élasto-plastiques à potentiel gouvernés par la théorie de Perzyna sont habituellement utilisés tels que la loi de Lemaitre ou la loi de Norton. La loi de Norton, plus simple d'emploi, est généralement utilisée pour réaliser des calculs paramétriques de dimensionnement des soutènements des galeries. Les limitations de cette loi conduisent au développement d'une nouvelle loi de fluage. Trois galeries sont modélisées avec FLAC 3D et l'évolution des convergences, des contraintes-déformations dans le terrain et des efforts dans le soutènement est présentée dans cette étude pour les deux lois de fluage.

ABSTRACT – The subject of this work is the numerical modelling of the long-term time-dependent behavior of deep galleries excavated in claystones as the layer of Callovo-Oxfordian (COX). One major issue is the reliable prediction for the evolution of efforts in the rigid support of galleries. Among the different Callovo-Oxfordian clay creep models identified by a state of art, constitutive laws considering visco-plastic potential described by Perzyna's theory are widely used as Lemaitre's law or Norton's law. The Norton's law, which is simpler used, is also used especially for parametric calculations for structural design of the supports of galleries. The drawbacks of this law lead to the development a new creep law. Closure, stresses-strains in the soil and efforts evolution in the rigid support for three galleries modeled with FLAC 3D are presented for the two creep laws.

1. Introduction

A court terme, les roches argileuses présentent généralement un comportement endommageable et fragile à la rupture, habituellement modélisé par les critères de plasticité de Mohr-Coulomb, Drucker-Prager ou Hoek-Brown. La teneur élevée de minéraux argileux confère à ces matériaux une plasticité et un comportement visqueux ou différé non négligeable à long-terme, communément modélisé par des modèles visco-élasto-plastiques à potentiel abordés par la théorie de Perzyna, comme la loi de Norton. Le dimensionnement de tunnels profonds excavés dans ces matériaux est alors sensiblement affecté par la prise en compte du comportement différé car cela conduit à des forces additionnelles (effort normal et moment fléchissant) et à différentes distributions et évolutions d'efforts dans le revêtement rigide des galeries. La loi de fluage utilisée pour modéliser ce comportement différé des argilites peut avoir un impact non négligeable sur l'estimation de cette distribution et évolution d'efforts, en conséquence, la stabilité à long terme et le coût de l'ouvrage peuvent être affectés par ce choix de modélisation.

Comme exemple d'application, le comportement à long-terme de trois galeries du Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (LSMHM) est modélisé avec FLAC 3D. Le

comportement différé de l'argilite est initialement modélisé avec la loi de Norton classiquement utilisé pour les calculs paramétriques de dimensionnement des galeries. Une zone endommagée autour de la galerie avec des paramètres mécaniques dégradés est prise en compte a priori pour représenter les observations constatées dans le LSMHM selon l'approche décrite par Saitta et al. (2017). Le suivi de l'évolution des déformations et de l'état des contraintes de certains points autour de la galerie révèle quelques inconvénients de la loi de Norton classique. Les déformations différées sont plus importantes pour les points élastiques soumis à des déviateurs élevés et moins importantes pour des points sur le critère de plasticité et soumis à des déviateurs plus faibles, puisque le fluage gouverné par la loi de Norton dépend uniquement du déviateur des contraintes. Dans ce contexte, une étude a été réalisée afin de développer analytiquement une nouvelle loi de fluage qui prend en compte la distance de l'état des contraintes au critère de plasticité et à l'état initial des contraintes. Cette nouvelle loi est implémentée sur FLAC 3D et les résultats sont présentés dans cet article.

2. Le comportement différé des argilites

Différentes approches de modélisation du comportement mécanique à long-terme des argilites sont identifiées dans la littérature. Dans cet article, nous nous consacrons à la modélisation du fluage primaire et secondaire, avec des modèles visco-élasto-plastiques à potentiel qui prennent en compte le temps implicitement, comme abordé par Boidy (2002).

2.1. La théorie visco-élasto-plastique à potentiel

Dans les lois élastoplastiques, les déformations totales impliquent des déformations élastiques réversibles et plastiques irréversibles. La règle de consistance prévoit que l'état de contraintes reste à l'intérieur de la surface de charge $F(\sigma_{ij}) = 0$. Cela permet de déterminer un multiplicateur plastique λ et les déformations plastiques, en faisant intervenir le potentiel plastique G_p .

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p; \epsilon_{ij}^p = \lambda \partial G_p / \partial \sigma_{ij} \quad (1)$$

Dans la formulation des lois viscoplastiques à potentiel, les déformations se partitionnent en élastiques réversibles et inélastiques (ou viscoplastiques) irréversibles. L'état de contrainte peut dépasser la limite élastique à court-terme (surcontrainte) et les déformations viscoplastiques générées à long-terme ramènent l'état de contraintes à la surface de charge (Figure 1). Les déformations viscoplastiques sont calculées à partir d'un potentiel thermodynamique Ω .

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^{vp}; \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \partial \Omega / \partial \sigma_{ij} \quad (2)$$

La loi de Perzyna décrite ci-après part du principe que le matériau est purement viscoplastique et le comportement visqueux est négligeable dans le domaine élastique :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^{vp}; \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \gamma < \Phi(F) > \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}}; F(\sigma_{ij}, \epsilon_{kl}^{vp}) = \frac{f(\sigma_{ij})}{\kappa(\epsilon_{kl}^{vp})} - 1 \quad (3)$$

Le taux des déformations viscoplastiques $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ dépendent d'un paramètre de viscosité γ , d'une fonction d'écoulement $\Phi(F)$, de la surface de charge $F(\sigma_{ij}, \epsilon_{kl}^{vp})$, d'une fonction de charge indépendante du taux de sollicitation et fonction de l'état des contraintes $f(\sigma_{ij})$ et d'une règle d'écrouissage $\kappa(\epsilon_{kl}^{vp})$ fonction d'une variable d'écrouissage de nature tensorielle, le tenseur des déformations viscoplastiques (ϵ_{kl}^{vp}) .

2.2. La loi de Norton

La loi de Norton décrite ci-après est un cas particulier de la loi de Lemaître :

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \frac{3}{2} (\dot{\epsilon}_{vp}) \frac{s_{ij}}{q}, \text{ avec } \dot{\epsilon}_{vp} = \gamma < q - \sigma_s >^n \quad (4)$$

Cette loi néglige l'effet de l'écrouissage apporté par les déformations viscoplastiques cumulées pour le calcul du taux des déformations différées $\dot{\epsilon}_{vp}$. Ainsi, ce taux de déformations viscoplastiques reste constant lorsque le déviateur des contraintes est maintenu constant et uniquement un fluage secondaire est représenté. Cette loi est indépendante de la pression moyenne et la vitesse des déformations dépend exclusivement du déviateur des contraintes. Le fluage d'un point soumis à un déviateur élevé et éloigné du critère de plasticité sera supérieur à celui d'un point soumis à un faible déviateur et à proximité du critère.

2.3. Mise en équation d'une nouvelle loi de fluage

Face à cette problématique, nous proposons une nouvelle loi de fluage qui exprime le taux de déformations viscoplastiques $\dot{\epsilon}_{vp}$ en fonction d'un taux de mobilisation de résistance $X(d_1, d_2)$, qui dépend des distances d_1 et d_2 de l'état des contraintes par rapport au déviateur de référence q_0 et au critère de rupture q_{max} , respectivement (voir Figure 1). Les équations qui définissent la nouvelle loi de fluage sont présentées ci-après :

$$\dot{\epsilon}_{vp} = A \times f(X), \text{ avec } X \in [0, +\infty] \text{ et } f(X) \in [0,1] \quad (5)$$

$$f(X) = \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{X}\right)^\alpha}, \quad X = \frac{d_1}{d_2} \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} d_1(q) = < q - q_0 > \\ d_2(p, q, \theta) = \frac{|M(\theta) \times p + q - N(\theta)|}{\sqrt{M(\theta)^2 + (1)^2}}, M = \frac{1}{\left(\frac{3+\sin\phi}{6\sin\phi}\right) \cos(\theta) + \frac{\sqrt{3}}{3} \left(\frac{1-\sin\phi}{2\sin\phi}\right) \sin(\theta)}, N = M \times c \times \frac{\cos\phi}{\sin\phi} \end{array} \right. \quad (7)$$

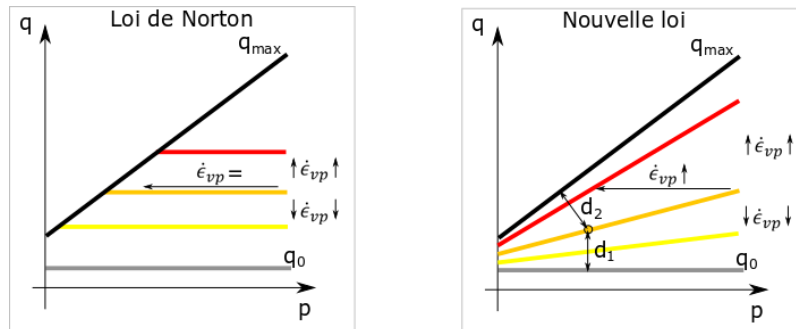


Figure 1. Principe d'évolution de la déformation visco-plastique des deux modèles

La prise en compte d'un critère de plasticité de Mohr-Coulomb en termes d'invariants du tenseur des contraintes permet le calcul des coefficients M et N , qui dépendent de la cohésion c , de l'angle de frottement ϕ et de l'angle de Lode θ . Le déviateur de référence est le déviateur associé à l'état des contraintes initial q_0 . Si l'état actuel des contraintes est à proximité de l'état initial ($d_1 = 0, X = 0$), le sol est peu endommagé et le taux de déformation viscoplastique est négligeable ($f(X) = 0$). Si l'état de contraintes atteint la limite de plasticité ($d_2 = 0, X = +\infty$), le matériau a atteint sa résistance maximale et le taux de déformation viscoplastique est maximal ($f(X) = 1$). Les vitesses de déformations viscoplastiques restent les mêmes si le taux de mobilisation de résistance reste constant. L'influence des paramètres d'échelle α et a sur la forme de la fonction $f(X)$ est présentée sur la Figure 2.

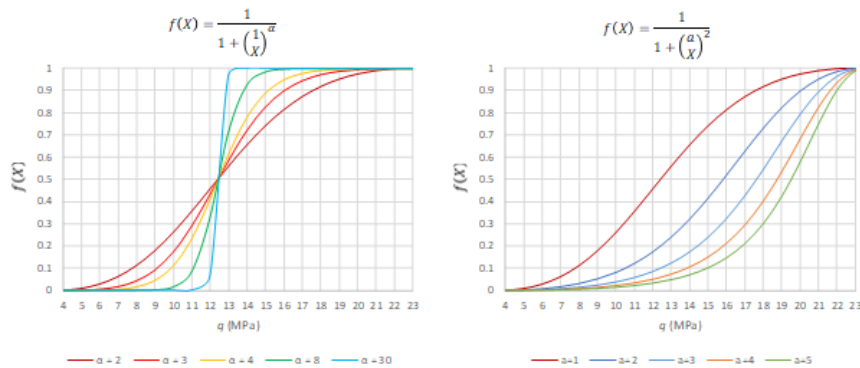


Figure 2. Influence du paramètre α (avec $a = 1$) et a (avec $\alpha = 2$) sur la forme de la fonction $f(X)$, pour $\theta = \pi/3$, $p = 13.8$ MPa, $c = 6$ MPa et $\phi = 20^\circ$.

3. Mise en œuvre pratique

Nous nous intéressons aux calculs du comportement différé des sections excavées de trois galeries du LSMHM (GCS, GED et GRD4) à partir de modèles FLAC 3D.

La GCS a un soutènement souple constitué de béton projeté (loi élastique linéaire) et cales compressibles (loi élastique parfaitement plastique), la GRD4 a un soutènement rigide constitué de béton armé et une couche de mortier à l'extrados, la GED est modélisée sans soutènement (cintres coulissants). Les galeries GCS et GRD4 sont parallèles à la contrainte majeure, la galerie GED est parallèle à la contrainte mineure. Les paramètres des modèles sont calés afin que les convergences calculées s'approchent de celles mesurées in situ au LSMHM représentées par la loi semi-empirique de Sulem (1983) et Sulem et al. (1987) avec les paramètres proposés par Guayacán-Carrillo (2017) pour les trois galeries étudiées.

Nous considérons un sol homogène et isotrope, néanmoins l'effet du caractère anisotrope du matériau sur les convergences est reproduit par l'adoption a priori d'une zone endommagée autour des galeries avec des paramètres dégradés (EDZ, voir Figure 3). L'étendue de cette zone est basée sur les observations au LSMHM et elle est fonction du diamètre d'excavation et de la méthode de creusement (méthode traditionnelle ou avec tunnelier). Le boulonnage radial du terrain est pris en compte par l'adoption de paramètres homogénéisés de cohésion et d'angle de frottement du terrain.

Deux lois de fluage sont utilisées pour le comportement différé de l'argilite : la loi de Norton et la nouvelle loi de fluage. Le comportement à court terme est défini par un critère de plasticité de Mohr-Coulomb avec une règle d'écoulement non associée pour le terrain sain et associée dans la zone endommagée ($\psi = 5^\circ$ ou 2° si l'EDZ est boulonnée).

Les détails des paramètres utilisés pour les modèles FLAC 3D sont présentés dans les figures et tableaux suivants.

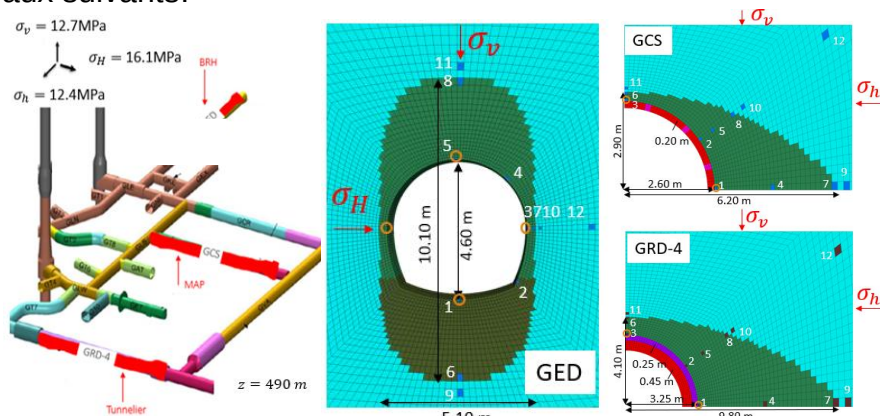


Figure 3. Galeries GCS, GED et GRD4 du LSMHM (à gauche). Modèles FLAC 3D, avec les points de suivi des convergences des galeries et des chemins de contraintes dans le terrain (à droite).

Les structures sont installées à un taux de déconfinement de 0.75 pour les galeries cintrées creusées en traditionnelle (GCS et GED) et un taux de 0.95 pour la galerie creusée au tunnelier (GRD4). Le comportement des cales compressibles est considéré élastique parfaitement plastique. Une interface frottante ($\phi = 20^\circ$) est prise en compte entre le soutènement et le terrain.

Pour les trois galeries, le calcul du fluage se poursuit jusqu'à 20 ans correspondant à l'échelle de justification des galeries du laboratoire. Les résultats sont stockés tous les mois jusqu'à la fin de la première année, puis tous les ans.

Tableau 1. Propriétés de l'argilite modélisée

	Saine	Fracturée boulonnée	Fracturée boulonnée non
Masse volumique ρ [kg/m ³]	2450	2450	2450
Module d'Young E [GPa]	4	4	4
Coefficient de Poisson ν [-]	0.3	0.3	0.3
Cohésion c [MPa]	6	0.8	0.6
Angle de dilatace ψ [°]	0	2	5
Angle de frottement ϕ [°]	20	25	25
Résistance à la traction σ_t [MPa]	0.9	0	0
Coefficient A [s ⁻¹ Pa ⁻ⁿ]	2.5e-59	2.5e-59	2.5e-59
Coefficient n [-]	6.8	6.8	6.8
Contrainte référence $\sigma_{ref,2}$ [MPa]	$\sigma_{VonMises}$	$\sigma_{VonMises}$	$\sigma_{VonMises}$

$\dot{\epsilon}_{vp}(t) = A \times \frac{1}{1 + \left(\frac{\alpha}{d_1(t)/d_2(t)}\right)^\alpha}$	A	a	n
GCS – GRD4	4×10^{-11}	2	3
GED	9×10^{-11}	2	3

4. Résultats

4.1. Comparaison des lois constitutives avec des mesures sur échantillon

Une comparaison du taux de déformation des lois et des mesures sur échantillon est présentée dans la Figure 4. Ces lois ont été calées sur les mesures en galerie (voir paragraphe suivant). Deux jeux sont nécessaires avec la nouvelle loi pour permettre un bon calage dans les deux directions de creusement. Un seul jeu apparaît suffisant avec la loi de Norton mais on constate que la loi tend à surestimer le taux de déformation à fort déviateur.

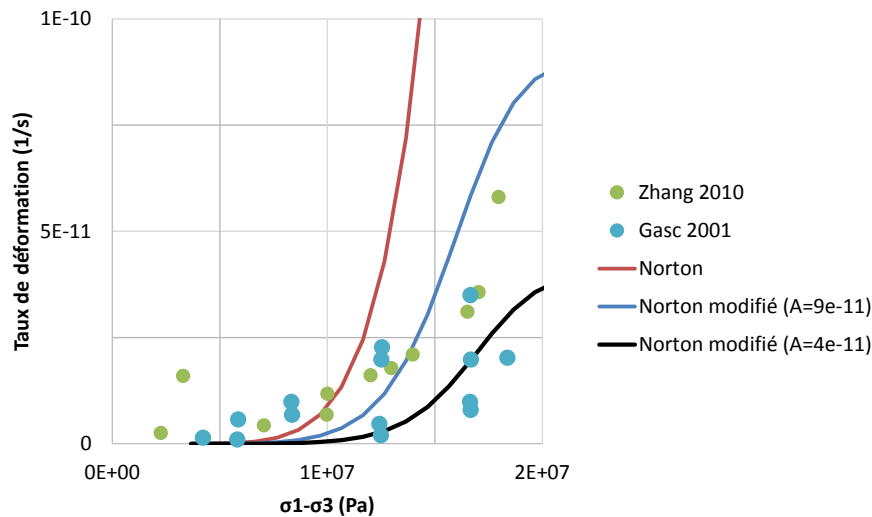


Figure 4. Taux de déformation en fonction du déviateur : mesures et modèles

4.2. Comparaison des lois constitutives en termes de convergence des galeries

Les résultats indiquent que les deux lois de fluage sont cohérentes pour estimer les convergences des galeries selon les deux directions de creusement (Figure 5), l'anisotropie des convergences étant introduite par la zone dégradée définie a priori autour des galeries. Les convergences de la galerie GRD4 ne sont pas présentées puisqu'elles

sont rapidement bloquées par la mise en place du soutènement rigide constitué de voussoirs en béton armé.

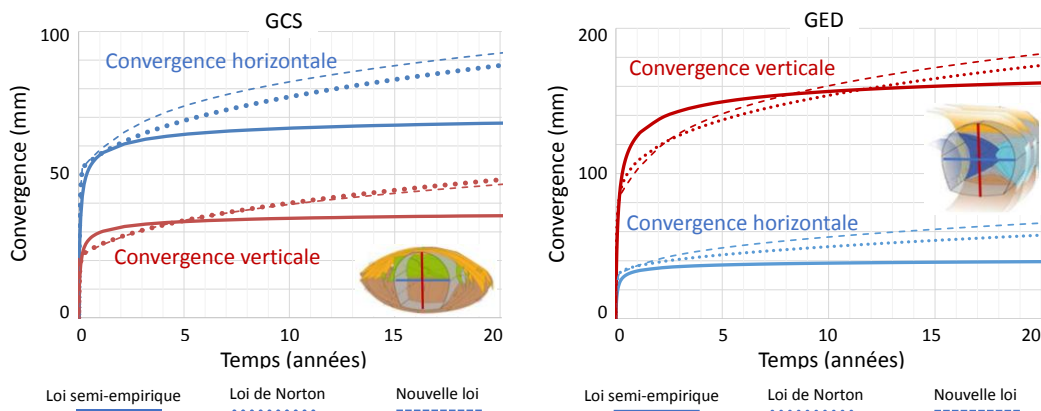


Figure 5. Calcul des convergences horizontales et verticales de la galerie GCS (galerie parallèle à contrainte majeure) et GED (galerie parallèle à la contrainte mineure)

4.3. Comparaison des lois constitutives en termes de chemin des contraintes

Le déconfinement des terrains induit par l'avancement de l'excavation et la mise en place du soutènement sont simulés avec FLAC 3D en appliquant un taux de déconfinement noté λ . L'état des contraintes et des déformations est suivi sur 12 points autour de la zone excavée, ce qui permet de tracer le chemin des contraintes pour chaque point (Figure 6 et 7). Dans ces figures, les lignes des déviateurs limites ont été tracées pour l'angle de Lode $\theta = 0^\circ$ (extension). Les résultats issus des deux lois de comportement sont relativement similaires. On remarque toutefois que la nouvelle loi montre une modification dans le temps plus marquée de l'état de contrainte des points 7 et 8 situés dans l'EDZ.

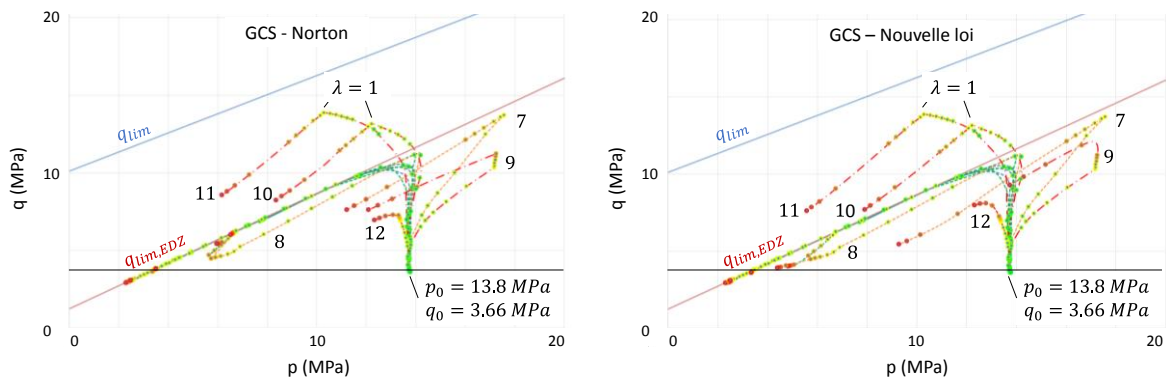


Figure 6. Chemin des contraintes pour la galerie GCS. Les points 9 à 12 sont hors l'EDZ. Le colleur jaune indique la fin du déconfinement et le début du fluage.

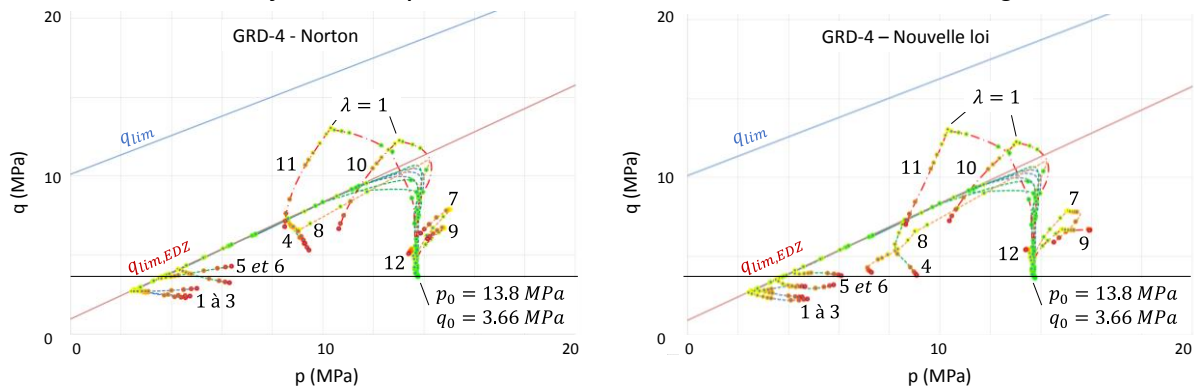


Figure 7. Chemin des contraintes pour la galerie GRD4. Les points 9 à 12 sont hors l'EDZ. Le colleur jaune indique la fin du déconfinement et le début du fluage.

4.4. Comparaison des lois constitutives en termes d'évolution des déformations

Avec la loi de Norton, les points dans le régime élastique et à l'extérieur de l'EDZ présentent les déformations viscoplastiques cumulées maximales (voir Figure 8 pour la galerie GRD4), puisqu'ils sont soumis aux déviateurs les plus importants. De plus, ces déformations cumulées sont plus importantes en voûte qu'en piédroit.

La nouvelle loi de fluage génère des déformations viscoplastiques conséquentes pour les points à l'intérieur de l'EDZ qui ont atteint le critère de rupture, notamment les points aux bords de l'EDZ derrière les piédroits. On remarque que quelle que soit la loi utilisée, aucune déformation viscoplastique est générée à proximité immédiate de la paroi puisque le déviateur des points concernés est plus faible que le déviateur initial en raison du déconfinement.

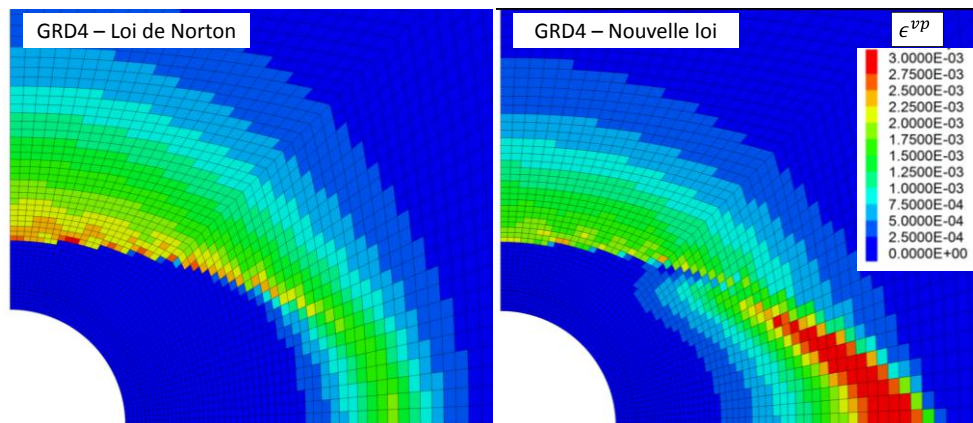


Figure 8. Déformation viscoplastique cumulée à 20 ans

4.5. Comparaison des lois constitutives en termes de distribution des forces et moments dans le revêtement

Les figures suivantes présentent une comparaison des calculs en termes de sollicitations internes au revêtement. Les deux lois développent des efforts normaux relativement similaires. Concernant la flexion, le modèle de Norton génère une flexion négative le long de l'anneau qui tend à plus comprimer l'intrados. La loi proposée montre quant à elle un changement de signe du moment fléchissant : au niveau des reins l'extrados est plus comprimé que l'intrados, au niveau de la voûte l'intrados devient plus comprimé. Le résultat obtenu avec la nouvelle loi semble à priori plus cohérent avec les observations faites par ailleurs sur la GRD4.

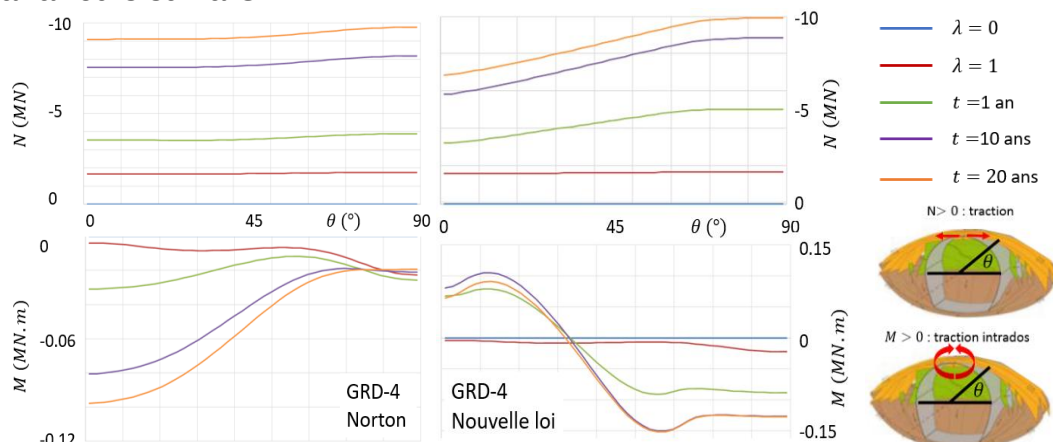


Figure 9. Profils d'effort normal et moment fléchissant dans le revêtement de la galerie GRD4.

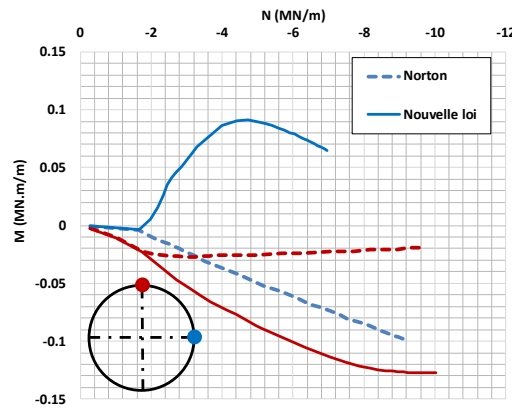


Figure 10. Diagramme d'effort normal et moment fléchissant au cours du temps dans le revêtement de la galerie GRD4.

5. Conclusions

La nouvelle loi de fluage développée sur un principe simple, à savoir que la vitesse de fluage dépend de la distance au critère de rupture, a été comparée avec la loi de Norton qui prévoit que la vitesse de fluage dépend uniquement du déviateur. Les deux lois ont été au préalable calées sur des lois de convergences représentatives de différentes galeries du LSMHM.

La comparaison des deux lois a ensuite montré que malgré des résultats similaires en termes de convergence et chemin de contraintes, il apparaît que des différences existent sur des déformations générées dans le terrain et les sollicitations internes développées dans un revêtement rigide. Concernant les sollicitations internes au revêtement rigide, on observe que le moment fléchissant est plus sensible à la loi utilisée par rapport à l'effort normal. Ceci s'explique par la relative grande sensibilité du moment aux conditions d'interfaces et aux variations de contraintes normales et de cisaillement. Il paraît donc primordial de caler les modèles de calculs à la fois sur des mesures de convergence issues de galeries « souples » et sur des mesures internes aux structures rigides afin d'être en mesure de bien simuler l'interaction sol-structure.

Ces résultats confirment l'intérêt du laboratoire de recherche souterrain de Meuse / Haute-Marne (LSMHM) et des instrumentations mises en œuvre pour améliorer la compréhension du comportement des galeries souterraines excavées dans l'argilite du Callovo-Oxfordien.

Remerciements : nous remercions l'Andra pour les données expérimentales issues du LSMHM qui ont pu être utilisées dans cette étude.

6. Références bibliographiques

- Armand, G. (2013). Etat de connaissance synthétique sur le comportement mécanique des argiles du callovo oxfordien. Document de l'Andra
- Boidy, E. (2002). Modélisation numérique du comportement différé des cavités souterraines. Univ. Joseph Fourier - Grenoble I
- Guayacán-Carrillo, L.-M. (2017). Analysis of long-term closure in drifts excavated in Callovo-Oxfordian claystone: roles of anisotropy and hydromechanical couplings. Univ. Paris Est
- Saitta, A., Lopard, G., Petizon, T., Armand, G., 2017. Projet Cigeo – Modélisation du comportement des argilites de la galerie GRD du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne 9
- Sulem, J. (1983). Comportement différé des galeries profondes. ENPC, France
- Sulem, J., Panet, M., Guenot, A. (1987). Closure Analysis in Deep Tunnels 10